

QITI SHENLENG FENLIGONG

气体深冷分离工

刘业志 梁 锋 杨春卉 编著



化学工业出版社

气体深冷分离工

刘业志 梁 锋 杨春卉 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

元 46.00 价 定

本书按照气体深冷分离工（高级、中级）的培训要求编写，内容包括工艺基础、电气仪表基础、常用设备操作与维护保养、工艺和设备异常现象处理、工艺计算、机械设备与腐蚀、安全生产和环境保护、产品分析项目及方法、质量管理、成本管理、记录填写和 ERP 基础、相关法律和法规等。

本书可供化工、石油化工、气体行业相关人员培训、学习使用，也可供相关技术人员参考。

气体深冷分离工

梁锋 杨春卉 刘业志 编著

图书在版编目 (CIP) 数据

气体深冷分离工/刘业志, 梁锋, 杨春卉编著. —北京:
化学工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-122-22059-2

I. ①气… II. ①刘…②梁…③杨… III. ①气体分离
IV. ①TQ028. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 239499 号

责任编辑: 李玉晖

文字编辑: 余纪军

责任校对: 王 静

装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 10 1/2 字数 251 千字 2015 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 40.00 元

版权所有 违者必究

前言

随着国内工业气体市场需求的不断扩大,大型空分设备及配套装置得到了迅速发展和广泛应用。空分装置向大型化、低能耗、高自动化、模块化发展是未来的趋势。单体空分装置规模越来越大,分离单质气体的新技术不断涌现,空分操作及控制技术越来越先进。为了提高空分操作人员的操作水平和管理人员的管理能力,使其尽快掌握空分行业的新工艺、新技术、新标准促进装置长周期稳定运行,结合目前国内空分装置的生产运行状况,我们编写了本书。

本书由长期从事空分生产一线的工程技术人员编写。本书从空分生产工艺流程出发,结合生产过程和维护检修实际比较系统地介绍了空分生产的基础知识、装置设备的结构性能、生产流程、工作原理、故障处理原则及处理方法、设备的维护与检修等内容。

本书具有较强的先进性、通用性、实用性。在内容叙述上尽量做到文字简练、语言通俗、图文并茂、图表清晰明了。本书可用作空分装置生产操作人员、技术人员、生产管理及设备管理人员的培训和自学用书,也可以作为大中专院校相关专业学生的参考教材。

本书由刘业志、梁锋、杨春卉编著。参加编写的还有周立福、王丽丽,由刘勃安审核。由于编写人员水平有限,编写时间仓促,难免有不当之处,希望广大读者批评指正。

编者

2014年10月

目 录

第一章 气体深冷分离工艺基础	1
第一节 原料、产品、半成品的组成及性质	1
第二节 深度冷冻制氧法概述	4
第三节 常用计量单位及换算	7
第二章 电气、仪表基础知识	10
第一节 电气基础知识	10
一、基本物理量	10
二、生产装置电气设备的防爆、防护	11
三、电机日常检查维护	13
第二节 仪器、仪表基础知识	15
一、化工仪表	15
二、自动调节系统	19
三、测量误差和仪表的质量指标	20
思考题及参考答案	22
第三章 设备操作与维护保养	23
第一节 活塞式压缩机	23
第二节 螺杆式压缩机	27
第三节 透平膨胀机维护保养	28
第四节 冷干机维护保养	30
第五节 冰机维护保养	30
第六节 纯化器维护保养	31
第七节 分馏塔维护保养	32
第四章 异常现象分析及处理	37
第一节 工艺异常现象分析及处理	37
一、空冷塔异常现象分析及处理	37

二、分子筛纯化器异常现象分析及处理	38
三、空分装置供气停止的原因及处理	39
四、供电中断的原因及处理	39
五、切换装置故障的原因及处理	39
六、仪表空气中断的原因及处理	40
七、总碳超标的原因及处理	40
八、下塔液空液位大幅度的波动的原因及处理	41
九、主冷液面下降的原因及处理	42
十、上塔超压的原因及处理	42
十一、空分塔液悬的原因及处理	42
十二、上、下塔阻力波动的原因及处理	42
十三、主换热器热端温差大的原因及处理	43
十四、提取稀有气体对空分装置的影响	43
十五、氮平均纯度对装置的影响	43
十六、全低压空分设备的耗冷与产冷关系	44
十七、膨胀过热度	44
十八、膨胀机轴瓦温度过高或过低的原因	44
十九、增压透平膨胀机应用	45
二十、空分装置产生泄漏的判断	45
二十一、全低压空分装置中膨胀机产冷量占总制冷量的比例	45
二十二、增加膨胀量，主冷液位提高的原因	45
二十三、透平膨胀机应用原理	45
二十四、透平膨胀机产生冷量，增压机出口气体温度升高的原因	46
二十五、影响透平膨胀机效率的因素	46
二十六、透平膨胀机机后温度过低的原因	46
二十七、下塔液空液面过高的原因	47
二十八、增压透平膨胀机发生飞车原因及处理	47
二十九、精馏塔的塔板数确定依据及塔板数多少对装置的影响	47
三十、空分精馏塔内各块塔板上的温度不同的原因及影响因素	48
三十一、下塔液氮取出量越大液氮纯度越低，而此时液空中氧含量提高的原因	48
三十二、空分精馏塔板形式及应用	48
三十三、空气中杂质及清除	48
三十四、空分装置中换热器类型	49
三十五、液空液面计失灵时，对下塔液空液位的判断	49
三十六、主冷凝蒸发器的液面保持一定高度的原因	49
三十七、全低压空分装置主冷凝蒸发器的操作	50
三十八、污液氮节流阀可调节下塔液氮和液空纯度，液空节流阀只能调节液空液面的原因	50
三十九、调整下塔产品纯度是调整上塔产品纯度的基础	51
四十、液空、污液氮纯度的控制	51
四十一、低温法兰泄漏的原因及处理	51

四十二、管道加装膨胀节的原因	52
四十三、空分冷箱内管路安装应注意的问题	52
四十四、管道及设备的脱脂	52
四十五、铝及铝合金焊接的特点	53
四十六、空分设备的试压和检漏方法	53
四十七、全低压空分装置热态启动时空气吃不进去的原因	53
四十八、影响空分装置运转周期的因素	54
四十九、试压注意事项	54
五十、接触氧气或液氧、氮气或液氮注意事项	54
五十一、充填保冷材料时需要采取的安全措施	55
五十二、排放低温液体时应注意的问题	55
五十三、噪声对人体危害及消除	55
五十四、氧气产量达不到指标的原因	55
五十五、提高空分能耗运转的经济性	56
五十六、主冷凝蒸发器泄漏的判断	56
五十七、低温阀门发生卡死的原因及解决	57
第二节 设备异常现象的分析及处理	57
一、活塞式压缩机异常现象分析及处理	57
二、离心式空气压缩机异常现象分析及处理	58
三、活塞式氨冷冻机异常现象分析及处理	59
四、膨胀机异常现象分析及处理	61
思考题及参考答案	62

第五章 工艺计算 64

第一节 机泵和换热设备的计算	64
第二节 单元操作过程的物料平衡计算	68
第三节 单元操作过程的热量平衡计算	69

第六章 机械设备知识 71

第一节 常用运转设备	71
一、泵	71
二、离心式压缩机	73
三、日常维护	76
第二节 阀门	76
第三节 塔设备	78
第四节 压力容器	78
一、压力容器的定义、特点和分类	78
二、压力容器用钢	80

三、压力容器的结构和零部件	80
第五节 换热设备	87
一、管式换热设备	88
二、板面式换热设备	90
三、管壳式换热器	98
第六节 设备腐蚀	101
思考题及参考答案	104
第七章 安全生产和环境保护	106
第一节 安全生产规章制度	106
第二节 主要易燃、易爆危险品的特性及安全指标	111
第三节 化工生产防火、防爆、防毒基本常识	112
第四节 化学危险品的管理与使用	113
第五节 化工机械、设备、仪表、元器件及电气安全	114
第六节 事故应急措施	116
第七节 环境保护和三废处理	119
思考题及参考答案	120
第八章 识图与制图	122
第一节 制图基础知识	122
第二节 化工设备图	122
第九章 质量管理基础知识	127
第十章 产品分析项目及方法	130
第十一章 成本管理	135
第十二章 记录填写和 ERP 基础知识	141
第一节 记录的种类和内容	141
第二节 ERP 基础知识	143
第十三章 法律和法规知识	147
第一节 劳动法	147
第二节 合同法	148
第三节 产品质量法	150
第四节 安全生产法	153

第一章

气体深冷分离工艺基础

第一节 原料、产品、半成品的组成及性质

1. 空气的物理性质

(1) 温度 温度是描述空气冷热程度的物理量，主要有三种标定方法：摄氏温标、华氏温标和绝对温标（又称热力学温标或开氏温标）。

(2) 压力 空气的压力就是当地的大气压，用符号 p 表示。常用单位有国际单位帕（Pa）；工程单位 kfg/cm^2 ；液柱高单位毫米汞柱（mmHg）和毫米水柱（ mmH_2O ）。

(3) 湿度 空气湿度是指空气中含水蒸气量的多少，有以下几种表示方法。

① 绝对湿度。即每平方米空气中含有水蒸气的质量，用符号 γ_z 表示，单位为 kg/m^3 。如果在某一温度下，空气中水蒸气的含量达到了最大值，此时的绝对湿度称为饱和空气的绝对湿度，用 γ_B 表示。

② 相对湿度。为了能准确说明空气中的干湿程度，在空调中采用了相对湿度这个参数，它是空气的绝对湿度 γ_z 与同温度下饱和空气的绝对湿度 γ_B 的比值，用符号 Φ 表示。

(4) 比焓 空气的焓值是指空气中含有的总热量，通常以干空气的单位质量为基准，称作比焓，工程上简称焓。因此，空气的比焓是指 1kg 干空气的焓和与它相对应的水蒸气的焓的总和，用符号 h 表示，单位是 kJ/kg 。

(5) 密度和比容 空气的密度是指每立方米空气中干空气的质量与水蒸气的质量之和，用 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。空气的比容是指单位质量的空气所占有的容积，用符号 ν 表示，单位为 m^3/kg 。因此空气的密度与比容互为倒数关系。

(6) 空气的密度 空气具有一定的质量，质量常用密度来表示。密度是单位体积内空气的质量，用 ρ 表示。

$$\rho = M/V$$

式中 M 、 V 分别为气体的质量与体积。

(7) 空气的黏度 黏度是空气质点相对运动时产生阻力的性质。空气黏度的变化只受温度变化的影响，而压力变化对其影响甚微，可忽略不计。空气的运动黏度与温度的关系如下。

$t/^\circ\text{C}$	0	5	10	20	30	40	60	80	100
$\nu/(\times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s})$	0.136	0.142	0.147	0.157	0.166	0.176	0.196	0.21	0.238

(8) 空气的压缩性与膨胀性 当气体的压力变化时体积随之改变的性质称为气体的压缩性；气体因温度变化体积随之改变的性质称为气体的膨胀性。空气的压缩性和膨胀性都远大于液体的压缩性和膨胀性。气体的体积随温度和压力的变化规律服从气体状态方程。

2. 空气及其组成气体的性质

空气是一种多组分混合气体，其主要组分是氧、氮、氩、二氧化碳，还有微量的稀有气体（氦、氖、氦、氡）、甲烷及其他碳氢化合物、氢、臭氧等。此外，空气中还有量少而不定的水蒸气及灰尘等。空气的组成如下。

成分	氮	氧	氩	二氧化碳	其他
体积分数/%	78.09	20.95	0.93	0.03	0.078
质量分数/%	75.53	23.14	1.28	0.05	0.075

若不考虑水蒸气、二氧化碳和各种碳氢化合物，则地面至 100km 高度的空气平均组成保持恒定值。在 25km 高空臭氧的含量有所增加。在更高的高空，空气的组成随高度而变，且明显地同每天的时间及太阳活动有关。

常温下的空气是无色无味的气体，液态空气则是一种易流动的浅黄色液体。一般当空气被液化时二氧化碳已经清除掉，因而液态空气的组成是 20.95%氧，78.12%氮和 0.93%氩，其他组分含量甚微，可以略而不计。

空气作为混合气体，在定压下冷凝时温度连续降低，如在标准大气压（101.3kPa）下，空气于 81.7K（露点）开始冷凝，温度降低到 78.9K（泡点）时全部转变为饱和液体。这是由于高沸点组分（氧、氩）开始冷凝较多，而低沸点组分（氮）到过程终了才较多地冷凝。

液态空气作为混合液，在定压蒸发时蒸发温度也是连续变化的。随着蒸发过程的进行，因低沸点组分氮较多地蒸发，混合液组成发生变化，致使液体的高组分氧含量相应地增加，所以沸点也就相应提高。

液态空气具有较低的沸点约 81.62K 和凝固温度（约 60.15K），可以用作冷却剂。通过减压（抽真空）的方法，还可以将其沸点温度降低到 65K 左右。但是这种操作是危险的，因为蒸发会使剩余液体中氧的浓度增加，在减压用的真空泵里引起爆炸。

空气中除氧、氮外还含有氩、氦、氖、氦、氡等稀有气体。氩是一种无色无味的气体；不燃烧，也不助燃；化学性质很稳定，一般状态下不生成化合物，没有毒性。

(1) 氧气的物理性质 氧气在常温常压下是无色无味的气体。标准状态下的密度为 1.43kg/m³，比空气略重。氧气较难溶解于水；在标准大气压下，氧在 -182.9℃ 时变为易流动的淡蓝色液体，在 -218.7℃ 凝固成无色透明的结晶。氧气与其他大多数气体的显著不同在于具有较强的顺磁性和助燃性。在标准大气压下，氧在 90.188K 时变为易于流动的淡蓝色液体；在 54.4K 时凝固成淡蓝色的固体结晶。液氧和固态氧的淡蓝色是含有少量的氧聚合物 O₄ 而引起的。

虽然氧的沸点比氮几乎高 13K，可是它的凝固点却比氮低约 9K。固态氧的密度大，因此在液氧中下沉。在 43.80K 和 23.89K 时，固态氧发生同素异形转变，并伴随有转化热。在 40.80K 时转化热超过溶化热，约为 23.2kJ/kg；在 23.89K 时转化热只有 2.93kJ/kg。

(2) 氧气化学性质及用途 氧气的化学性质非常活泼，它能跟许多物质（单质或化合物）发生化学反应，同时放出热量；反应剧烈时还燃烧发光。由于氧的化学活性很强，是一

种强氧化剂，所以氧同碳氢化合物混合是很危险的，液氧中存在碳氢化合物结晶体已不止一次引起过严重的爆炸事故。因此，液氧必须严格避免同各种油脂、润滑油、炭、木材、沥青、纺织物品接触。

氧气用于金属的焊接及切割，气焊时氧与乙炔相混合可以加速乙炔的燃烧过程。

氧气被广泛地应用于高炉及炼钢生产中和铁钢的熔炼过程及轧钢过程中，在由矿石熔炼生铁的高炉中把氧吹入炉中可使高炉的生产能力提高 80%。当在转炉顶吹氧气炼钢时可大大提高炼钢速度，提高生产能力，改善钢的质量，降低成本并节省燃料。

氧气也是化肥工业上的煤气化、重油汽化常用的汽化剂和氧化剂。

(3) 氮气的物理性质 氮气在常温下是一种无色无味的气体，比空气稍轻，难溶于水。它不能燃烧也不能助燃，可用来灭火。标准状态下的密度为 1.25kg/m^3 ，在 -195.8°C 时变为易流动的液体，液氮冷却到 -210.0°C 时转变成透明的结晶体。液氮的蒸发温度为 77.36K 。在标准大气压下，液氮冷却到 63.2K 时转变成无色透明的结晶体。液氮的沸点和凝固点之间的温差不到 15K ，因而在用真空泵减压时容易使其固化。因固态氮的密度比液氮大，所以沉降在底部。在大约 35.6K 时，固态氮产生同素异形转变，并伴随比热容的增大。转化热约为 8.2kJ/kg 。氮气为惰性气体，对人有窒息性。

产品气体物性常数表见表 1-1。

表 1-1 产品气体物性常数表

项 目	单 位	氧(O_2)	氮(N_2)
相对分子质量	—	32.00	28.02
1 大气压下沸点	$^\circ\text{C}$	-182.83	-195.8
1 大气压下熔点	$^\circ\text{C}$	-218.25	-209.71
临界压力	MPa(G)	5.03	3.382
临界温度	K	154.78	126.26
固体密度	kg/m^3	1400	947
饱和液体密度	kg/m^3	1140	810
饱和蒸汽密度	kg/m^3	4.8	4.61
标准状态密度	kg/m^3	1.4289	1.2506
在空气中质量成分	%	23.15	75.52
在空气中体积成分	%	20.95	78.09

(4) 氮气化学性质及用途 氮气的化学性质不活泼，在通常情况很难跟其他元素直接化合，故可用作保护气体；但在高温下，氮能够同氢、氧及某些金属发生化学反应。氮无毒，又不能磁化，其沸点比空气低，所以液氮是低温研究中最常用的安全冷却剂，但需当心窒息。液氮也用于氢、氨液化装置中，作为预冷。液氮应小心储存，避免同碳氢化合物长时间的接触，以防止碳氢化合物过量溶于其中而引起爆炸。

氮气除了用于化肥工业上的合成氨的原料气外，还用于化工生产，炼钢等保护气，吹洗设备，液氮在火箭技术中应用，压送氧化剂等。

氮气在许多场合可作为易燃易爆物质的保护气。在空分装置的保冷箱内充以干燥氮气，保证一定正压，可以排除湿气和防止氧的积聚。

第二节 深度冷冻制氧法概述

炼钢和冶炼有色金属需要氧，氧应用于气焊与气割，同时氧还是化工生产过程中重油和煤气化的氧化剂。

早期使用化学方法，即吸附法制氧。现代工业基本采用深度冷冻分离空气，制取纯氧和纯氮。在用氧量较大时，用深度冷冻分离法最经济。

深度冷冻法分离空气制氧机，是先空气压缩，冷却后液化，利用氧氮沸点的不同，在蒸气与液体经过塔板接触时，高沸点的氧组分不断从蒸气中冷凝而进入液体，中沸点的氮组分不断从液体中蒸发而变成蒸气，使下降液体的含氧量越来越高，上升蒸气的含氮量越来越高，达到把空气分离为氧、氮的目的。

由于空气的液化和精馏是在低温下进行的，并且温度低于 -120°C 所以称为深度冷冻分离法。就大中型制氧方法有高低压法、自清除的全低压板式流程和全低压分子筛流程。

高低压法工艺落后，噪声大、功耗高、流程复杂，产品纯度不易控制，已逐渐被全低压流程所取代。

自清除的全低压板式流程也称冻结法，是利用空气中的水分和二氧化碳的析出温度高的特点，用可逆式换热器回收低温产品气体的冷量和冷却空气，同时将空气中的水分和二氧化碳冻结在空气的通道内，当返流气体通过时，靠分压升华的原理，利用返流气体的不饱和性，自动清除空气中的水分和二氧化碳。其特点是切换阀切换频繁，易出现故障，设备多，流程较为复杂，功耗大。

全低压分子筛流程又称净化吸附流程。现代大型全低压空分装置用净化空气代替原来冻结、吸附相结合的方法。随着吸附剂的性能改善，以及吸附工艺的改善，特别是吸附剂共吸附性能的利用，使用吸附剂能同时清除空气中的 H_2O 、 CO_2 、 C_2H_2 以及一部分 C_nH_m ，大大地简化了空气净化工艺。空分工艺流程也得到改善。吸附净化空气的工艺成为主要的空气净化方法。

1. 全低压分子筛流程原理

空气分离是利用液化空气中氧、氮等各组分沸点的不同，采用精馏的方法，将各组分分离开来。为达此目的，空分装置的工作应包括下列几个过程。

(1) 空气的压缩 经原料空气过滤器清除了灰尘和其他机械杂质的原料空气首先在空气压缩机中被压缩到工艺流程所需的压力，其中一小部分空气在纯化后再经与膨胀机同轴异端匹配的增压到更高压力。空气由于压缩而产生的热量由空气冷却器中的冷却水带走。

(2) 空气中水分和二氧化碳的清除 加工空气中的水分和二氧化碳由于凝固点较高，在进入空分装置低温设备后将会形成冰和干冰，堵塞低温设备的通道，而影响空分装置的正常工作，为此需要利用分子筛纯化器预先把空气中的水分和二氧化碳清除掉。

进入分子筛纯化器的空气温度约为 8°C ，出纯化器的空气温度由于分子筛吸附而产生的吸附热约上升到 14°C 左右。

(3) 空气被冷却到液化温度 空气的冷却是在主换热器中进行的，在主换热器中，空气被来自精馏后的返流产品气体和污氮气冷却到接近液化温度，产品气体及污氮气则被复热到接近常温。

(4) 冷量的制取 为了确保、维持装置正常生产、运行所需的热量平衡,克服由于绝热跑冷、换热器复热不足及直接从冷箱中向外排放低温液体等引起的冷量损失,需要不断地向装置补充冷量,装置所需的补充冷量是由等温节流效应和压缩空气在膨胀机中绝热膨胀对外做功而制取的。

(5) 空气的液化 空气的液化是进行氧、氮分离的首要条件,空气在主热交换器中被返流气冷却到接近液化温度,并在下塔实现空气的液化。

对于同一种物质,在不同的压力下,其对应的饱和温度不同。压力高,其饱和温度也高,亦即压力越高,蒸汽越容易液化,反之亦然。

氮气和液氧的热交换是在冷凝蒸发器中进行的。由于氮气和液氧两种流体所处的压力不同。所以在氮气和液氧的热交换过程中,氮气被液化而液氧被蒸发。氮气和液氧分别由下塔和上塔供给,这是保证上、下塔精馏过程进行所必须具备的条件。

(6) 精馏 空气的精馏是在精馏塔亦即上、下塔中进行的。在下塔中空气被初次分离成富氧液空和氮气,液空由下塔底部抽出后,经节流入与液空组分相近的上塔塔板上,一部分液氮由下塔顶部抽出后经节流入上塔副塔顶部。液空和液氮在节流前先在过冷器中过冷。减少节流汽化,在下塔中部另又抽出部分污液氮经节流送入上塔副塔底部。

空气的最终分离是在上塔进行的。产品氧气由上塔底部抽出,而产品氮气则是上塔副塔顶部抽出,并通过主换热器与进塔的加工空气进行热交换,复热到常温后送出冷箱。上塔副塔底部抽出的污气氮在主换热器内复热后出冷箱。

(7) 危险杂质的清除 采用分子筛纯化流程,大部分碳氢化合物等危险杂质已在纯化器内清除掉,残留部分仍要进入塔内,并积贮在冷凝蒸发器中。其间由于液氧的不断蒸发,将会有使碳氢化合物浓缩的危险,但只要从冷凝蒸发器中连续排放部分液氧就可防止碳氢化合物的浓缩。而当在冷凝蒸发器中提取液氧产品,就可不采用另外排放液氧来防止碳氢化合物浓缩的措施。

2. 全低压大型分子筛流程的特点

全低压大型分子筛流程选用冷冻机预冷分子筛吸附和带增压机的透平膨胀机组。其特点如下。

1) 安全可靠。空分装置的爆炸是氧气生产中最大威胁,而引起爆炸的主要原因是乙炔和碳氢化合物的存在和积累。采用分子筛吸附净化空气,可使空气中的杂质、水分、二氧化碳、乙炔和碳氢化合物在冷箱外几乎全部除掉。为了避免乙炔和碳氢化合物在冷凝蒸发器内积聚增浓,从其底部抽出约为氧气1%的液氧作为安全排放,连续排入液氧喷射蒸发器,被产品气氧蒸发气化,与气氧一起作为产品氧气送出,从而保证了空分装置安全可靠生产。

2) 冷箱内设备大大减少,简化了流程。进冷箱空气纯净性好,因而冷箱内设备结构简单紧凑,易于操作、检修,运行安全可靠。特别是主换热器,只起换热作用,不需切换,无疲劳应力作用,使设备使用寿命延长。

3) 空气冷却塔采用穿流式筛板塔结构,同原来采用的喷淋式空冷塔相比阻力小,效率高,传热效果好。

4) 采用了卧式活性氧化铝及分子筛的双床层吸附器,下部设有分布器,上部设有耙平机构,减小阻力,提高了净化效率。在国产大型空分设备中是首次采用。空气中的水分首先被活性氧化铝吸附,提高了分子筛吸附二氧化碳和碳氢化合物的能力,并且由于活性氧化铝

容易解析水分，能有效地减少再生能耗。同时吸附热也比分子筛小，可降低空气温升。另外，活性氧化铝能抵抗空气中酸性水源的侵蚀，起到保护分子筛的作用。吸附器再生选用带蓄热器的电加热器再生系统，电加热器不需频繁切换，延长了使用寿命，并可大大减少电耗。

5) 采用带可调喷嘴的增压透平膨胀机组，提高了膨胀压力。这不仅增加了制冷量，而且减少了上塔的膨胀空气量和空压机吸气量，从而实现节能目的，氧提取率达 91% 以上。

6) 充分利用纯氮以过冷液空及纯液氮，从而改善精馏。

7) 采用分子筛流程，增加了高纯度氮气产量，相对地使单位产品电耗下降。

3. 规整填料上塔、全精馏制氮的内压缩流程

该流程的优势在于能够确保空分装置的安全性更高，主要原因如下：

① 用液氧泵取代氧压机，可减少因氧压机带来的安全隐患；

② 从主冷凝蒸发器中大量抽取液氧，极大地减少了碳氢化合物的积聚；

③ 产品液氧在高压下蒸发，使烃类物质积累的可能性大大降低。

其工艺流程如下。

(1) 压缩、预冷和前端净化 经空气过滤器滤除尘埃和其他机械杂质后的空气，经过空气压缩机压缩至 0.6MPa (A) 后进入管壳式空冷器，经过低温水冷却后送纯化器，此低温水是通过循环水在氨水塔冷却后得到的。

自管壳式换热器出口的空气通过由纯化器组成的吸附 H_2O 、 CO_2 和碳氢化合物的吸附系统，去除大量有害元素如 SO_2 、 SO_3 、 NH_3 。2 台纯化器交替运行，1 台运行时，另 1 台再生，定时自动切换。

空分装置正常运行时，仪表空气从纯化器出口抽取送出。空分装置开车用的仪表空气由仪表空压机提供。

正常情况下，纯化器只需要做普通再生。此时，污氮气在再生蒸汽加热器中加热至约 150℃ 后送到纯化器，解析并带走吸附下来的有害杂质。

特殊情况下，如分子筛中毒失效时，再生用气体（此时为空气）可通过特殊再生加热器进一步加热至 290℃，对纯化器进行彻底活化。

(2) 空气精馏和分离 从纯化器来的净化空气分成两股。一股空气进入冷箱内主换热器，被返流气体冷却后进入低压塔。另一股空气进入增压机，这股空气又分成两部分。一部分空气经透平增压机第一段增压后，进入膨胀机的增压机中增压，然后被冷却器冷却至常温后进入主换热器，被返流气体冷却到后进入膨胀机，膨胀制冷后进入低压塔参与精馏；另一部分空气在增压机的第二段继续增压，经冷却后进入主换热器，与高压液氧换热。高压空气经节流后进入低压塔。

空气经低压塔初步精馏后，获得液空、纯液氮和污液氮，并经过冷器过冷后节流进入高压塔。经高压塔进一步精馏后，在高压塔底部获得液氧，一部分液氧作为液体产品进入液氧储罐，一部分经液氧泵加压后进入主换热器，复热后出冷箱，进入氧气管网。

在低压塔顶部得到产品液氮，一部分经液氮泵加压后进入主换热器，复热后出冷箱，进入氮气管网；一部分经过冷器过冷后分成两股，其中一股作为液体产品送入液氮储罐，另一股节流后送入高压塔。正常工况不取出液氮。

从高压塔上部引出污氮气和氮气经过冷器、主换热器复热后送出冷箱，一部分污氮气去分子筛纯化系统作为分子筛再生气源，余下的污氮气和氮气去氨水塔冷却后循环水。

(3) 氮的精馏和提取 从低压塔中部抽取一定量的氮馏分送入粗氮塔。粗氮塔在结构

上分为两段，第二段粗氩塔底部的回流液经液氩泵加压后送入第一段顶部作为回流液；氩馏分经粗氩塔精馏得到粗氩，并送入精氩塔中部，经精氩塔精馏后在塔底得到 99.999% 精液氩。

(4) 冷量的获得 空分所需的大部分冷量是通过透平膨胀机膨胀低温增压空气而获得。

(5) 储槽和后备系统

① 液氧储槽和后备系统 来自高压塔底部的液氧进入液氧储槽。液氧经过液氧泵升压至 4.2MPa (G)，并在水浴式蒸发器中气化后，作为 4.2MPa (G) 后备氧气输出。

② 液氮储槽和后备系统 来自低压塔顶部的液氮进入液氮储槽。液氮经过液氮后备泵升压至 3.0MPa (G)，在水浴式蒸发器中气化后，作为后备氮气输出。

③ 液氩储槽 来自精氩塔的液氩进入液氩储槽。储槽中的液氩由充车泵送入液氩槽车。

可靠的液体储存和后备系统能够在新建空分装置停车时，保证全区氧气供应 72 小时、氮气供应 96 小时。

内压缩流程特点如下。

(a) 采用全低压分子筛净化吸附、空气增压循环、增压透平膨胀机制冷、全精馏无氢制氩、产品氧气和氮气内压缩工艺流程。此流程设备配置合理、操作及维修方便，安全，低耗。

(b) 可靠的液体储存及后备系统能够保证一段时间内的氧、氮供应。

(c) 超净空气过滤器、全浸式主冷、在线碳氢化合物分析仪、低压塔底部铜填料和液氧泵流程可以最大限度地确保空分装置安全运行。

(d) 用管壳式空冷器取代空冷塔，杜绝了吸附系统和冷箱进水的可能性。

(e) 采用立式吸附器，占地面积小，吸附剂使用寿命长，可达 15 年以上。

(f) 除铝制板式换热器及相连管线外，冷箱内所有塔、阀门和除与主换热器连接的部分管道外，全部采用奥氏体不锈钢，焊接质量容易保证，刚性强、耐腐蚀，对焊接场地无特殊要求，施工工期短，并能有效地减少由于内漏导致更换绝热材料的可能性。

(g) 高压塔、低压塔及氩精馏塔全部采用规整填料，运行变负荷范围大（单塔为 55%~110%），负荷调整速度快（约每 3min 变 1% 产量）。可针对不同的用气情况，迅速调整负荷，保证最佳运行状况。

(h) 压缩机采用电驱动，尽量减少装置中转动机械数量，与汽轮机驱动压缩机相比，机械故障率较低。

(i) 装置可以做到自动变负荷（约每 3min 变 1% 产量）。借助后备系统，变负荷速度可达每分钟 3%，能满足用户不同阶段的需求。

第三节 常用计量单位及换算

在我国国际制 (SI) 单位虽已开始推行，工程制单位在生产、设计中使用仍很普遍，而且化学工程中常用的一些物理、化学数据有许多仍以物理制 (cgs) 单位表示。因此，我们有必要了解一些常用的单位制度以及它们之间的换算关系。

物理制的基本单位是：长度单位厘米 (cm)，质量单位克 (g)，时间单位秒 (s)。国际制的基本单位共有 7 个，化工中常用的有下面 5 个：长度单位米 (m)，质量单位千克

(kg)，时间单位秒 (s)，温度单位开尔文 (K)，物理数量单位摩尔 (mol)。这两种单位制以质量为基本单位，属于绝对单位制系统。工程制的基本单位是：长度单位米 (m)，力或重量单位千克力 (kgf)，时间单位秒 (s)。这种制度的特点是以力而不以质量作基本单位，属于重力单位制系统。

从各种来源得到的数据，其单位不一定符合要求，必须进行单位换算，此项工作若在运算当中临时进行极易发生错漏，以预先做好为宜。表 1-2 为 cgs 制、SI 制和工程制之间的换算关系。

表 1-2 cgs 制、SI 制和工程制之间的换算表

名称	cgs 制	SI 制	工程制
长度	cm 厘米	m 米	m 米
	1	10^{-2}	10^{-2}
	100	1	1
面积	cm ² 厘米 ²	m ² 米 ²	m ² 米 ²
	1	10^{-4}	10^{-4}
	10 ⁴	1	1
体积	cm ³ 厘米 ³	m ³ 米 ³	m ³ 米 ³
	1	10^{-6}	10^{-6}
	10 ⁶	1	1
质量	g 克	kg 千克	kgf · s ² /m 千克力 · 秒 ² /米
	1	10^{-3}	1.02×10^{-4}
	1000	1	0.102
重量(力)	9807	9.807	1
	dyn 达因	N 牛顿	kgf 千克(力)
	1	10^{-5}	1.02×10^{-6}
	10 ⁵	1	0.102
压力	9.807 × 10 ⁵	9.807	1
	bar 巴	Pa 帕斯卡	kgf/m ² 千克(力)/米 ²
	1	10 ⁵	10200
	10 ⁻⁵	1	0.102
能量,功,热	9.807 × 10 ⁻⁵	9.807	1
	erg 尔格	J 焦耳	kgf · m 千克(力) · 米
	1	10^{-7}	1.02×10^{-8}
	10 ⁷	1	0.102
	9.807 × 10 ⁷	9.807	1

续表

名称	cgs 制	SI 制	工程制
功率, 传热速率	erg/s 尔格/秒	kW 千瓦	kgf · m/s 千克(力) · 米/秒
	1	10^{-10}	1.02×10^{-8}
	10^{10}	1	102
	9.807×10^7	0.009807	1
黏度	P 泊	kg/m · s 千克/米 · 秒	kgf · s/m ² 千克(力) · 秒/米 ²
	1	0.1	0.0102
	10	1	0.102
	98.07	9.807	1